

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2001-283222  
(P2001-283222A)

(43)公開日 平成13年10月12日(2001.10.12)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マコ-ト*(参考)
G 0 6 T 7/00	3 5 0	G 0 6 T 7/00	3 5 0 A 5 B 0 5 7
	1 0 0		1 0 0 B 5 L 0 9 6
1/00	3 4 0	1/00	3 4 0 A

審査請求 有 請求項の数24 O L (全 17 頁)

(21)出願番号 特願2000-255778(P2000-255778)

(22)出願日 平成12年8月25日(2000.8.25)

(31)優先権主張番号 09/538209

(32)優先日 平成12年3月30日(2000.3.30)

(33)優先権主張国 米国 (U S)

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72)発明者 セバスチャン・ロイ

アメリカ合衆国、 ニュージャージー

08540、 プリンストン、 インディペン

デンス ウェイ 4 エヌ・イー・シー・

リサーチ・インスティテューテュ・インク  
内

(74)代理人 100088328

弁理士 金田 暢之 (外2名)

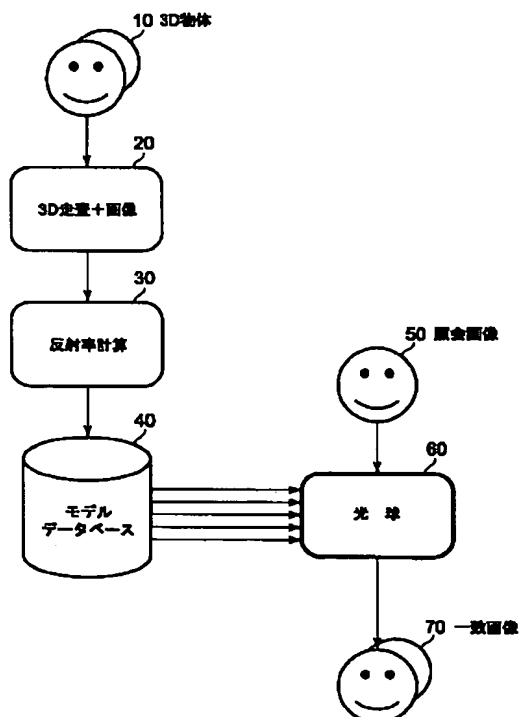
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 2次元画像をデータベース内の複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法

(57)【要約】

【課題】 2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する。

【解決手段】 前記2次元画像の位置及び向きを定める段階と、各3次元候補モデルに対して、前記2次元画像内の対応する値に基づいて、各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備するヒストグラム状の表を計算する段階と、前記対応する計算された輝度ヒストグラム状の表と連係して前記面法線を使用して、前記定められた位置及び向き内で各3次元候補モデルを次々に描画する段階と、前記2次元画像を前記描画された3次元候補モデルのそれぞれと比較する段階とを有する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法であって、前記2次元画像の位置及び向きを定める段階と、各3次元候補モデルに対して、前記2次元画像内の対応する値に基づいて、各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備するヒストグラム状の表を計算する段階と、前記対応する計算された輝度ヒストグラム状の表と連係して前記面法線を使用して、前記定められた位置及び向き内で各3次元候補モデルを次々に描画する段階と、前記2次元画像を前記描画された3次元候補モデルのそれぞれと比較する段階とを有する、2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法。

【請求項 2】 前記2次元画像と前記描画された3次元モデルとの間の比較が所定の許容誤差の範囲内であれば、前記2次元画像が前記複数の3次元モデルの1つと一致するかを定める段階を更に有する、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】 前記比較段階は、前記描画された3次元モデルのそれぞれに対して、前記対応する3次元モデルが前記2次元画像と一致する可能性を示す順位付けを行なう、請求項1に記載の方法。

【請求項 4】 前記2次元画像と一致する前記3次元モデルとして、最も高い順位となる前記描画された3次元モデルに対応する前記3次元モデルを選択する段階を更に有する、請求項3に記載の方法。

【請求項 5】 前記比較段階は、描画された3次元モデルのそれぞれに対して、前記レンダリング段階と同時に行われる、請求項1に記載の方法。

【請求項 6】 各3次元モデルの前記レンダリング及び前記方法の性能を改善するために、光球ヒストグラム状の表を平滑化する段階を更に有する、請求項1に記載の方法。

【請求項 7】 前記平滑化段階は、箱形関数または他の小さい平滑化カーネルを具備するたたみ込みにより行われる、請求項6に記載の方法。

【請求項 8】 2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法であって、前記2次元画像の位置及び向きを定める段階と、各3次元候補モデルに対して、前記2次元画像内の対応する値に基づいて、各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備するヒストグラム状の表を計算する段階と、前記ヒストグラム状の表の中の単一の引数値を形成するためにひとまとめにされた同様な法線値の集合である各バケットを形成するために使用される前記輝度係数の分散を計算する段階と、前記ヒストグラム状の表バケットの前記分散の和を計算する段階と、

前記計算された和を誤差関数として使用し、前記対応する3次元モデルが前記2次元画像と一致する可能性を示すように前記3次元候補モデルを順位付けする段階とを有する、2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法。

【請求項 9】 前記2次元画像と一致する前記3次元モデルとして、最も高い順位となる前記3次元モデルに対応する前記3次元モデルを選択する段階を更に有する、請求項8に記載の方法。

10 【請求項 10】 複数の3次元モデルを含むデータベースから前記3次元モデルを読取る段階を更に有する、請求項1または請求項8に記載の方法。

【請求項 11】 前記計算段階は、前記ヒストグラム状の表の前記計算に使用される反射率の最低閾値を設定する、請求項1または請求項8に記載の方法。

【請求項 12】 前記計算段階は、前記ヒストグラム状の表の前記計算に使用される強度の最低及び／または最高閾値を設定する、請求項1または請求項8に記載の方法。

20 【請求項 13】 前記2次元画像はカラー画像であり、前記輝度係数は前記カラー画像の各色成分に対して計算される、請求項1または請求項8に記載の方法。

【請求項 14】 前記分散の前記和は、各バケット内のサンプルの数により重みをかけられる、請求項8に記載の方法。

【請求項 15】 2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法であって、前記2次元画像の原因となっている物体の位置及び向きを定める段階と、

30 3次元候補モデルの現実的な画像を描画するために使用される前記2次元画像の原因となった照明を可能にする照明の影響の表現を計算する段階と、前記対応する計算された照明の影響の表現と連係して面法線を使用して、前記定められた位置及び向き内で各3次元候補モデルを次々に描画する段階と、前記2次元画像を前記描画された3次元候補モデルのそれぞれと比較する段階とを有する、2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法。

40 【請求項 16】 2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法であって、前記2次元画像の原因となっている物体の位置及び向きを定める段階と、

特定の3次元候補モデルが特定の2次元画像の原因となった尤度の評価を可能にする、前記複数の3次元候補モデルと前記2次元画像とに基づく照明の影響の表現を計算する段階と、前記計算された照明の影響の表現に基づいて、照会を生成した尤度が最も高い3次元候補モデルを選択する段階とを有する、2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法。

【請求項 17】 2次元画像をデータベースに蓄積された複数の3次元候補モデルの1つと照合するために、コンピュータ読取り可能な媒体の中に具体化されたコンピュータ・プログラム・プロダクトであって、前記2次元画像の位置及び向きを定めるためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記2次元画像内の前記対応する値に基づいて、前記3次元候補モデルの各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備し、各3次元候補モデルに対するヒストグラム状の表を計算するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記対応する計算された輝度ヒストグラム状の表と連係して前記面法線を使用して、各3次元候補モデルを前記定められた位置及び向き内で次々に描画するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記2次元画像を前記描画された3次元候補モデルのそれぞれと比較するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段とを有する、コンピュータ・プログラム・プロダクト。

【請求項 18】 2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つに照合する方法段階を実行するための機械によって実行可能な命令のプログラムを具体的に実現する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置であって、前記方法は、前記2次元画像の位置及び向きを定める段階と、各3次元候補モデルに対して、前記2次元画像内の対応する値に基づいて、前記3次元候補モデルの各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備するヒストグラム状の表を計算する段階と、前記対応する計算された輝度ヒストグラム状の表と連係して前記面法線を使用して、前記定められた位置及び向き内で各3次元候補モデルを次々に描画する段階と、前記2次元画像を前記描画された3次元候補モデルのそれぞれと比較する段階とを有する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置。

【請求項 19】 2次元画像をデータベースに蓄積された複数の3次元候補モデルの1つと照合するために、コンピュータ読取り可能な媒体の中に具体化されたコンピュータ・プログラム・プロダクトであって、前記2次元画像の位置及び向きを定めるためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記2次元画像内の前記対応する値に基づいて、前記3次元候補モデルの各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備し、各3次元候補モデルに対するヒストグラム状の表を計算するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記ヒストグラム状の表の中の単一の引数値を形成するためにひとまとめにされた同様な法線値の集合である各バケットを形成するために使用される前記輝度係数の分散を計算するためのコンピュータ読取り可能なプログラ

ム・コード手段と、前記ヒストグラム状の表バケットの前記分散の和を計算するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記計算された和を誤差関数として使用して、前記対応する3次元モデルが前記2次元画像に一致する可能性を示すように前記3次元候補モデルを順位付けするためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段とを有する、コンピュータ・プログラム・プロダクト。

10 【請求項 20】 2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つに照合する方法段階を実行するための機械によって実行可能な命令のプログラムを具体的に実現する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置であって、前記方法は、前記2次元画像の位置及び向きを定める段階と、各3次元候補モデルに対して、前記2次元画像内の対応する値に基づいて、前記3次元候補モデルの各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備するヒストグラム状の表を計算する段階と、前記ヒストグラム状の表の中の単一の引数値を形成するためにひとまとめにされた同様な法線値の集合である各バケットを形成するために使用される前記輝度係数の分散を計算する段階と、前記ヒストグラム状の表バケットの前記分散の和を計算する段階と、前記3次元モデルをその計算された和を誤差関数として使用して、前記対応する3次元候補モデルが前記2次元画像と一致する尤度を示すように順位付けする段階とを有する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置。

30 【請求項 21】 2次元画像をデータベースに蓄積された複数の3次元候補モデルの1つと照合するために、コンピュータ読取り可能な媒体の中に具体化されたコンピュータ・プログラム・プロダクトであって、前記2次元画像の原因となる物体の位置及び向きを定めるためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、3次元候補モデルの現実的な画像を描画するために使用される前記2次元画像の原因となった前記照明を可能にする照明の影響の表現を計算するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記対応する計算された照明の影響効果の表現と連係して前記面法線を使用して、各3次元候補モデルを前記定められた位置及び向き内で次々に描画するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、前記2次元画像を前記描画された3次元候補モデルのそれぞれと比較するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段とを有する、コンピュータ・プログラム・プロダクト。

50 【請求項 22】 2次元画像を複数の3次元候補モデル

の 1 つに照合する方法段階を実行するための機械によって実行可能な命令のプログラムを具体的に実現する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置であって、前記方法は、

前記 2 次元画像の原因となっている物体の位置及び向きを定める段階と、

3 次元候補モデルの現実的な画像を描画するために使用される前記 2 次元画像の原因となった照明を可能にする照明の影響の表現を計算する段階と、

前記対応する計算された照明の影響の表現と連係して面法線を使用して、前記定められた位置及び向き内で各 3 次元候補モデルを次々に描画する段階と、

前記 2 次元画像を前記描画された 3 次元候補モデルのそれぞれと比較する段階とを有する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置。

【請求項 23】 2 次元画像をデータベースに蓄積された複数の 3 次元候補モデルの 1 つと照合するために、コンピュータ読取り可能な媒体の中に具体化されたコンピュータ・プログラム・プロダクトであって、

前記 2 次元画像の原因となる物体の位置及び向きを定めるためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、

特定の 3 次元候補モデルが特定の 2 次元画像の原因となった尤度の評価を可能にする、複数の 3 次元候補モデルと前記 2 次元画像とに基づく照明の影響の表現を計算するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段と、

前記計算された照明の影響の表現に基づいて照会を生成した尤度が最も高い 3 次元候補モデルを選択するためのコンピュータ読取り可能なプログラム・コード手段とを有する、コンピュータ・プログラム・プロダクト。

【請求項 24】 2 次元画像を複数の 3 次元候補モデルの 1 つに照合する方法段階を実行するための機械によって実行可能な命令のプログラムを具体的に実現する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置であって、前記方法は、

前記 2 次元画像の原因となっている物体の位置及び向きを定める段階と、

特定の 3 次元候補モデルが特定の 2 次元画像の原因となった尤度の評価を可能にする、複数の 3 次元候補モデルと前記 2 次元画像とに基づく照明の影響の表現を計算するためのコンピュータ読取り可能な段階と、

前記計算された照明の影響の表現に基づいて、照会を生成した尤度の最も高い 3 次元候補モデルを選択するためのコンピュータ読取り可能な段階とを有する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、全体としてコンピュータ・ビジョンに関し、特に、任意のポーズ及び照明

状態下において、顔或いは物体の任意の 2 次元 (2D) 画像が提示された場合に、3 次元 (3D) モデルの蓄積されたデータベースの中から顔或いは他の物体を認識及び照合することに関する。

【0002】

【従来の技術】顔の認識及び物体の認識は、本発明の分野に密接に関連しているコンピュータ・ビジョンの 2 つのサブフィールドである。顔の認識は、主として、人の顔の 2D 画像の照合、或いは顔の 2D 画像と他の同様な 2D 画像との照合に係ってきた。従来技術による方法は、2D 画像を照合するために顔の 3D モデルは使用していなかった。

【0003】しかしながら、物体認識の分野は、既知の 3 次元モデルに基づく 2D 画像の照合に主に係ってきた。この領域には多くの研究がある。更に最近の例は、「整列」と呼ばれるものを使用する方法である。

【0004】通常の方法は、グレースケール画像からいくつかの特徴を抽出し、次にモデルからの候補の特徴と照合することから成る。特徴の例としては、(角のような) 特別な点、抽出されたエッジ、(時には「リボン」と呼ばれる平行なエッジのような) エッジの配置などがある。物体認識に関する文献における主要な課題は、

(1) 良い特徴を選択する方法、(2) 多数の画像特徴を多数のモデル特徴と照合する可能性がもたらす組合せの急増を管理する方法、(3) 多数の誤差の原因が存在する状態で照合の質を測定する方法、に集中している。照明の問題は、照合のために特徴が抽出される (早い) 段階で、主として生ずる。物体認識に関する従来技術は、上記の段階 (1) (ポーズ推定として) の実行に重要な関係を有するが、段階 (2) 及び (3) で必要とされる光の影響を説明する問題については、ほとんど触れていない。

【0005】一方、顔の認識は、照明の処理に重大な関心を持ってきた。顔の認識に関する文献は、照明の変化を扱う多くの方法を発展させてきた。これらは 2 つの主な処理法、すなわち、(1) (上記の段階 (2) のように) 照明状態の推測、或いは (2) 照明の変化に伴い創り出される画像の空間の分析、に集中している。通常、最も多くの変化が起こる画像空間の次元を知るために、方法 (2) は「主成分分析」(PCA) を利用している。これらの代表的な画像ベース法は、ポーズが変化しない状態の下ではかなりの成功を収めた。しかしながら、画像から 3D モデルを構築し、画像と 3 次元構造との間の関係に関心をもった当業者はいたが、コンピュータ・ビジョンの大部分の研究者がそうであったように、これらの代表的な画像ベース法は、3D モデルの使用には一般に関係していない。

【0006】認識の基礎となる PCA 分析を認める線形化を許容するために、観察される陰影に関連して、顔の歪みの空間を使用する他の当業者による研究も多い。こ

これらの当業者は、顔の表面の標準の特徴点を置くグラフの歪みに基づく方法、或いは同様な方法を使用しており、これらの方法は市販されているシステムに応用されている。多くのグループが最近数年間に顔の認識に興味を持ってきており、過去5年位の間に現れた文献は非常に多い。しかしながら、これら全ての方法の主要関心事は、他の2D画像のトレーニングセットに基づいて2D画像を照合することであった。

【0007】顔の認識に対する関心が急増した主要寄与要因は、その問題に対してPCA法の応用に成功したことであった。これは、かなりの難問題であると今まで考えられていたものが取り扱いやすい解であったため、印象的であった。しかしながら、データを収集する必要がある条件の変化に対して、いくつかの厳しい制限があり、特に、照明、ポーズ及び尺度が可能な限り一定でなければならないという厳しい制限があった。これらの制限は、PCAが線形分解であるために、応用される場所が線形空間であるときにのみ、良い結果を与えるという事実に遡ることができる。変化するポーズの下での画像の空間は線形ではなく、従ってPCAが破綻する。当業者は、非線形空間をPCAの対象となる線形の空間に変換する特別な方法を見い出すことにより、この課題に対処した。更に別の当業者は、最も単純な場合には、このような単純な物体の任意の画像は、ほとんど任意の3つの異なる照明状態の下での画像の線形の組み合わせであるにすぎないことを指摘した。これは、この分野における活動を先導し、照明と画像の空間の間の関係を厳密に算出する研究を完成させた。しかしながら、影が存在する状態では、状況は依然として非常に複雑であることが指摘されている。

【0008】当業界では、人の顔の3Dモデルを収集するための公知の装置が存在する。これらの装置は、収集される3Dモデルと整合して顔の画像を収集する。3Dモデルは、顔の表面上の通常約640×640の大量の点(point)の3D座標に加えて、各点におけるカラーの画素値から成る。これにより、任意の視点からの顔の現実的なコンピュータ・グラフィックスによる表示が可能である。

【0009】これらの装置は、大量の顔のモデルを収集するために使用されることが可能であり、ある応用例においては、この数は約百万或いはそれ以上に達する。

【0010】このような装置の1つの応用例は顔を照合する装置、すなわち、顔の任意の2D画像から成る照会(query)について、以前に収集された顔の3Dモデルの大規模データベースを検索して、その2D画像に最も合致するモデルを見つけるための装置である。

【0011】これを達成するためには、克服しなければならない多くの障害がある。一般には、照会画像(query photograph)が撮影された状態の知識はなく、また、その状態を制御することもできない。従って、照会画像

のポーズ(すなわち被写体の位置と向き)及び照明状態は不明である。

【0012】この設定において、照会をモデルに照合するための従来の技術によるパラダイムの1つは、次のように進む。

【0013】1) 照会における顔のポーズが決定される。本出願においては、「ポーズ」は顔の3D位置及び向きであると定められる。

【0014】2) 照会における照明が決定される。これは、照会画像が収集されたときに被写体を照明している任意の数の光源の向き、強度及び色彩を見い出すことを意味する。

【0015】3) 次に、データベース内の各モデルに対して、段階(1)及び(2)で決定したポーズ及び照明状態で、モデルの現実的な画像を描画するために、コンピュータ・グラフィックス技術が使用される。

【0016】4) 前段階で計算されたレンダリングの中で、照会に最も良く近似しているものが発見される。

【0017】これら全ての段階は、現在の最新技術が克服していない難点を持っている。本発明の方法は、第2、第3及び第4の段階に関する。すなわち、照会の照明状態を発見し、それらの照明状態の下で、どの提案された候補が照会に最も良く似ているかを判定することに関する。

【0018】

【発明が解決しようとする課題】上述した従来技術による方法の障害は、照明状態を得るために、画像に撮られた表面の3D構成とその反射率特性とを知る必要があることである。しかしながら、照会はこの情報については直接何も提供しない。過去40年間以上のコンピュータ・ビジョンにおける多大の努力は、1つ以上の画像からこの情報を推測することに当てられた。

【0019】従来技術による方法は、画像放射照度方程式(ランベルトの画像方程式)を解くことで照明をまず先に解くことによって、上述の段階(2)及び(3)を実行する。画像放射照度方程式は、可能性のある各光源に対する5つの独立変数を有する連立1次方程式である。2つの変数は光(例えば、方位及び方位角)の向きを示し、3つの変数はそれぞれ赤、青及び緑の強度を示している。方程式の数は、それに対して面法線と反射率が得られる画像の中のデータ点の数に、色成分の数(通常は3)を乗じた数に等しい。しかしながら、重要な制約条件は、光強度が負ではないという必要条件である。この後者の必要条件は、連立1次方程式に対する標準の方法を使用して前記の連立1次方程式を解くことを妨げ、代わりに、線形計画法或いは非負の最小2乗法として知られるアルゴリズムのような、より高度の方法を必要とする。これらの特別な技術は、同じ連立1次方程式が非負値性の制約条件のない場合に必要とするであろうコンピュータ時間よりも、大幅に多いコンピュータ時間

を必要とする。上述したように、この方法は当業者により発表された。

【0020】従って、本発明の目的は、2D画像をデータベースに含まれている複数の3D候補モデルの1つと照合する方法を提供することであり、データベース内では、光源或いは固有ベクトル決定のような他の複雑で多大の費用を要する計算を解く必要なしに物体が照合されることである。

【0021】本発明の他の目的は、2D画像をデータベースに含まれている複数の3D候補モデルの1つと照合する方法を、照明を解く従来技術による方法と比較して低コストで提供することである。

【0022】本発明の更に他の目的は、2D画像をデータベースに含まれている複数の3D候補モデルの1つと照合する、従来の方法よりも簡単である方法を提供することである。

【0023】本発明の更に他の目的は、2D画像をデータベースに含まれている複数の3D候補モデルの1つと照合する、当該問題のサイズに対して1桁或いは2桁多くのコンピュータ時間を消費する反復アルゴリズムを必要としない方法を提供することである。

【0024】

【課題を解決するための手段】本発明は、2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法であり、前記2次元画像の原因となっている物体の位置及び向きを定める段階と、3次元モデルの現実的な画像を描画するために使用される前記2次元画像の原因となった照明を可能にする照明効果の表現を計算する段階と、前記対応する計算された照明効果の表現と連係して面法線を使用して、前記定められた位置及び向き内で各3次元候補モデルを次々に描画する段階と、前記2次元画像を前記描画された3次元候補モデルのそれぞれと比較する段階とを有する。

【0025】2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する他の方法が更に提供される。この方法は、前記2次元画像の原因となっている物体の位置及び向きを定める段階と、前記複数の3次元候補モデルと特定の3次元候補モデルが特定の2次元画像の原因となった可能性の評価を可能にする前記2次元画像とに基づいて、照明効果の表現を計算する段階と、照明効果の前記計算された表現に基づいて、照会を生成した可能性が最も高いモデルを選択する段階とを有する。

【0026】2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法の第1の変形において、本方法は、前記2次元画像の位置及び向きを定める段階と、各3次元候補モデルに対して、前記2次元画像内の対応する値に基づいて、前記モデルの各面法線に対して計算され、該対応する面法線にのみ依存する輝度係数を具備するヒストグラム状の表を計算する段階と、前記対応する計算された輝度ヒストグラム状の表と連係して前記面法線を使

用して、前記定められた位置及び向き内で各3次元モデルを次々に描画する段階と、前記2次元画像を前記描画された3次元モデルのそれぞれと比較する段階とを有する。

【0027】2次元画像を複数の3次元候補モデルの1つと照合する方法の第2の変形において、本方法は、前記2次元画像の位置及び向きを定める段階と、各3次元モデルに対して、前記2次元画像内の対応する値に基づいて、前記モデルの各面法線に対して計算され、該面法線にのみ依存する輝度係数を具備するヒストグラム状の表を計算する段階と、前記ヒストグラム状の表の中の単一の引数値を形成するためにひとまとめにされた同様な法線値の集合である各バケットを創出するために使用される前記輝度係数の分散を計算する段階と、前記ヒストグラム状の表バケットの前記分散の和を計算する段階と、前記3次元モデルをその計算された和を誤差関数として使用し、前記対応する3次元モデルが前記2次元画像と一致する可能性を示すように順位付けする段階とを有する。

【0028】本発明の方法、及びその変形の方法段階を実行するための機械により実行可能な命令のプログラムを具体的に実現する、機械により読み取り可能なプログラム記憶装置、ならびに、本発明の方法及びその変形を実行するためにコンピュータ読取り可能な媒体の中に具体化されたコンピュータ・プログラム・プロダクトが更に提供される。コンピュータ・プログラムは、本発明の方法及びその変形の段階に対応するモジュールを有することが望ましい。

【0029】

【発明の実施の形態】本発明は、多数の様々な形式の物体の照合に適用可能であるが、人の顔を認識する状況において特に有用であることが判明している。以下では、本発明の適用可能性を人の顔を認識に制限せずに、このような状況における本発明について説明する。

【0030】本発明の方法は、人の顔をデータベースに含まれる複数の3Dモデルの1つと合致させるように、照会画像を比較する効率的な方法を有する。本発明の方法は、ランベルト条件として知られる反射率の特定のモデルを仮定する。本発明は、真の反射率のこのモデルからの偏差に対して安定であるが、重要な点は、これが照会内のデータとモデル内のデータとの間の関数関係であることであり、すなわち、照会とモデルとを関連させる方程式があることである。本発明の方法は、この関数関係の予想される形式が、照会と得られた推定モデルとの間でどの程度まで成り立つかを測定する効率的な方法であると見ることもできる。この方法は一般化することができ、例えば、相関の統計的概念は関数関係の一般化である。

【0031】主に情報理論にて生じる他の一般化は、比較対象の物体を支配する分布のエントロピーに依存す

る。これらの分布は、例えば、2つの物体における異なる測定の画素値 (point value) を支配するであろう。エントロピーは不確定性の尺度と見なすことができ、すなわち、エントロピーが大きいほど、確率分布から1つのサンプルを抽出する結果を予測することが困難となる。結合同時分布 (jointdistribution) を備える2つの確率変数、例えば、3Dモデル及びそのモデルから推定した2D画像のデータ値がある場合、他の変数、例えば2D画像内の対応する画素における強度の値を予測するために、これらの確率変数、例えば3Dモデル上の9点パッチの1つの値を知ることが、どの程度まで役立つかを判定することができる。この問題は、第2の変数の周辺分布のエントロピー間の差異を得ることにより、また、第1の変数が与えられた第2の変数の条件付き分布のエントロピーを減算することにより、数量化される。これにより、第1の変数を知ることによって不確定性がどのくらい減少したかが得られることになる。これは次式により要約することができる。

【0032】

【数1】

$$I(Y; X) = H(Y) - H(X|Y)$$

ここで、Hはエントロピーを示し、Xは第1の確率変数であり、Yは第2の確率変数である。I (Y ; X) により示されるこの量は、XとYとの間の相互情報量として知られている。これは対称であり、また次式と等しい。

【0033】

【数2】

$$H(X) + H(Y) - H(X, Y)$$

ここで、H (X, Y) はX及びYの結合同時分布のエントロピーである。

【0034】従って、本発明の方法は、3Dモデルと2D照会 (を決定する分布) の間の相互情報量を測定するための特別な近似であると考えることができる。

【0035】照会が創り出されたポーズ及び照明状態の下で、各モデルの外観を予測することにより、2D画像照会がこのようなモデルの大規模データベース内の3Dモデルと照合されるシステムにおいて、本発明の方法は、連続した各3Dモデルを候補解として使用し、法線にのみ依存する各面法線に対する輝度係数を指定するヒストグラム状の表を照会と連係して構築することによって、照会画像を生成した光源を解く問題を回避する。本発明の方法の1つの変形では、次にこれらの輝度係数を使用してすでに近似的に知られているポーズでモデルが描画され、描画された画像が照会画像と比較され、誤差が計算される。この誤差は、照合のためにモデルの順位を判定する。他の変形では、描画は行われず、代わりに、輝度対法線ヒストグラム状の表の各「バケット」におけるサンプルの分散が計算され、品質測定 (quality

measure) を算出するために、サンプルの数により重み付けされたこの分散が全てのバケットに対して合計される。次に、品質測定は誤差測定 (error measure) として同様の方法で照合のために使用される。

【0036】照会のポーズに対して、必ずしも正確ではないが良い解があるものと仮定される。しかしながら、どのモデルが照会画像を生成したかは不明であり、照会に対して照明状態がどうであったかも不明である。

【0037】従って、本発明の方法は次のように進行する。

【0038】a. 次々に、各モデルが「正しい」ものであると仮定する。

【0039】b. 照会画像を使用して、「輝度」係数を各法線と結びつけてヒストグラム状の表を計算する。

(カラー画像に対しては、通常、赤、緑及び青の各色成分に対して1つずつ、3つの係数を計算することが望ましい。) 次に、本方法には2つの望ましい変形がある。第1の変形は次の通りである。

【0040】c 1. 考慮中のモデルの法線を段階 (b) で計算された法線/輝度ヒストグラムと連係して、使用して、照会が撮影されたときと推定上同じ照明状態の下でのモデルの画像を描画する。

【0041】d 1. このモデルが実際に正しいものである尤度を順位付けするために、照会を描画された画像と比較する。

【0042】第2の変形は、これらの最後の2つの段階を次のように置換する。

【0043】c 2. 法線/輝度ヒストグラムを構築するときに追加情報を退避した後に、ヒストグラムの各バケットを計算するために使用された輝度係数の分散を計算する。(「バケット」とは、ヒストグラム内の単一の引数値を形成するために、1つにまとめられた近い法線値 (normal value) の集合である。) d 2. 各バケット内のサンプル数により重み付けされたヒストグラム・バケットの分散の和を計算する。正しいものを選択するためのモデルの順位付けに、この和を誤差測定として使用する。

【0044】段階 (b) では、段階 (2) として議論された上述のパラダイムにおける照明の解決が回避された。しかしながら、段階 (c 1) では、パラダイムの段階 (3) で必要とされるレンダリングを行うことは依然として可能である。代わりの評価段階 (c 2) 及び (c 3) では、3Dモデルと2D画像照会との間の一致の可能性の評価において、レンダリングを全て回避することが可能である。

【0045】従って、本発明の方法は、光源すなわち照会画像を生成した照明の計算は、真の目標に対しては単にプロセスの中間段階に過ぎない、との観察に基づくものである。総合的システムにおけるプロセスの真の目標は、照会に対する比較のためにそれらの照明状態の下で

照合候補を描画すること、或いは、このような描画をせずに、しかも同等の結果となるようにモデルが照会に一致する相対的な可能性を実際に計算することである。

【0046】最終的に測定されているものは、各法線と関連付けられた帰属輝度係数(imputed brightness coefficient)の整合性である。3Dモデルの法線及び反射率値(reflectance value)が照会の観察された強度と結びつけて使用されるため、これは2D画像の照会を3Dモデルに適合する場合の誤差の基準である。

【0047】本発明の方法は、ランベルトの反射率モデルに基づいている。ランベルトの条件によれば、点光源により照明された物体のモノクローム写真における点に投射された強度は次の量にのみ依存する。

【0048】R；画像内の対応点の原因となる物体の点における「反射率」、

N；当該点における表面に対する「法線」(すなわち、その点における表面に対する唯一の垂直方向)、

L；点から光への方角を表す単位ベクトル、及び  
b；その点における光源の強度。

【0049】特に、画像内の観察された強度は、視点には依存せず、物体の固有特性及び照明方向と強度に依存する。

【0050】観察された画像強度は、次の数式により記述される。

【0051】

【数3】

$$I = RbL * N$$

ここで、Iは当該像点における画像強度であり、\*は通常の内積である。

【0052】各点における量R、b、L及びNが与えられれば、3Dモデルからレンダリングを行なうためには、数式3の乗算を行うのみで良い。更に、モデルのどの部分が見えるかを判定しなければならないが、これは既存のコンピュータ・グラフィックス技術により十分に実行できる。

【0053】解かれるべきモデル照合問題の状況は、各モデルに対してR及びNは既知であり、Iは照会から知ることができ、b及びLは未知である。上述したパラダイムにおける段階(2)を含む1つの処理法は、b及びLを解き、次に数式3の乗算を行うことである。

【0054】本発明の方法の処理法は、合成量 $bL * N$ のみを解くことを試み、次に(上述した第1の変形において)数式3の乗算を行う。

【0055】各点において、数式3を除算すると、次式が得られる。

【0056】

【数4】

$$bL * N = I / R$$

この量をB(N)、輝度係数と呼ぶ。

【0057】レンダリングの後、数式3は次式となる。

【0058】

【数5】

$$I_{rendered} = B(N)R$$

これが単に1点にのみ行われるならば、これはとるに足らないことであり、始まりの照会の「I」に戻るようになる。しかしながら、一般に、モデル内の全ての法線に対して、同じ法線或いはほとんど同じ法線を有する多くの他の点があろう。同じ法線が生ずる度に得られた全てのBの値が平均され、モデルから画像を描画するために数式5が使用された場合、照会内の「I」に対する近似のみを得ることになるであろう。例え、与えられたNに対してB(N)を得るために平均されるそれぞれの値は、材料特性、測定誤差、非直線性などの僅かな変化のために異なっているが、照会はモデルに確かに一致している場合は、B(N)により表される平均は、数式5に対して必要とされる数の良い近似であり、観察された照会強度に良い近似を与えるであろうと予想される。しかしながら、照会が実際にはモデルと一致しないときには、強度Iは照会から来ているが、使用されているNの値は異なるモデルから来ているため、B(N)値の間の相関は少ないと予想される。また、レンダリングのために数式5の中に挿入されるとき、平均が照会内の値に近い結果を与えることは起こらない。この場合には、照会が実際にモデルと一致した場合よりも、レンダリング結果が照会から大きい誤差を有することが理解されよう。

【0059】Bは面法線ベクトルを数にする関数であり、すなわち、 $B: S^2 \rightarrow R$ である。ここで、 $S^2$ は、3次元空間に埋め込まれた表面に対する全ての可能な法線方向の空間(すなわち多様体)であり、いわゆるガウス球(Gaussian sphere)である。2は、この球の面が、普通の球の表面のように、2次元であることを示す。この理由により、本発明の方法はガウス球の上で定められた輝度関数(brightness function)を見つけようと試みるため、「光球(lightsphere)」法と呼ばれる。

【0060】今までのところは、単一点光源及びモノクローム画像を使用して、説明を行なった。モノクロームから色彩に一般化するために、モノクロームに対する計算が、各色成分に対して1回ずつ、計3回行われる。

【0061】照明の一般化は、色彩と異なり、単純ではない。一般に、照明は、単純な点光源よりもはるかに複雑である。表面の任意の点には、見える範囲の半球体内の全ての方向から入射する光が有り、この照明は点ごとに変化する可能性がある。各点において、照明は、また、ガウス球上のその点により表される方向から来る光の強度を記述するガウス球上の関数である。一般に、この関数は空間の全体にわたって点ごとに変化する可能性がある。更に全ての光源が無限遠にあると仮定すれば、照明関数は点ごとに変化せず、全体の照明はガウス



球上の関数であると考えることができる。

【0062】数式3をこの状況に一般化するために、単にガウス球上で積分するか、或いは加算により積分を近似する。Nを有する正の内積をもたらし方向の光のみが貢献するため、非直線性が導入されるという点でわずかに厄介な問題がある。表面の背後の光からの負の輝度はない。しかしながら、これは、下記のような形式の新しい照明方程式が同じ法線に出会うときは常に同じ光分布を使用し、従って、単一の点光源の時と同様に数式4の計算及び数式5のレンダリングは有効であるという、キーポイントを妨げるものではない。

【0063】

【数6】

$$I = Rf(N)$$

位置に無関係であり法線にのみ依存している数式3及び数式6の双方に対して、「影 (cast shadow)」がないと想定していることに注意すべきである。影は、鼻が頬に影を映す時のような、非局所的相互作用を原因とする影である。影は、月の照らされた部分のみが夜に見えるように、物体がなめらかに光源から離れることに伴って生じる「陰 (attached shadow)」とは区別される。本発明の方法は、影の効果を無視する。

【0064】実際に、より複雑な照明では、異なったモデルと照合する場合には、モデル上の同じ法線に対して、異なる光源が照会に作用するという事実がより大きい誤差をもたらし、正しいモデルを照合する場合には、誤差の同様な増加をもたらしことはない。従って、この照明の非線形性は、実際に本発明の有効性を増加させる。

【0065】同様な観察が、鏡面反射に関しても成り立つ。画像内の鏡面反射の位置は、2つの重要な点で数式3のランベルトの条件に反する。

1. 鏡面反射の位置はカメラの視点に依存する。
2. 鏡面反射の輝度は、照明ベクトル或いは法線ベクトルのいずれに対しても線形には変化しない。

【0066】これらの問題は、光源の問題を解く必要がある任意のシステムに鏡面反射を組み込むことを、決して不可能ではないが困難にする。従って、鏡面反射は多くの場合に誤差を増加させる。

【0067】しかしながら、光源が無限遠にあり、影がないとの仮定を継続すれば、鏡面反射が存在しても、数式6は近似的に適用することができる。詳細には、新しい数式は次式となる。

【0068】

【数7】

$$I = Rf(N) + Sg(N)$$

ここで、Sg(N)は反射光の鏡面反射成分を表す。SはRに対比して表面の特定の点の光沢度であり、一方、

g(N)は法線の関数としての強度変化を表す。

【0069】数式4の光球計算を数式7に適用すれば次式を得る。

【0070】

【数8】

$$I/R = f(N) + Sg(N)/R$$

しかしながら、仮にこれがB(N)であれば、R及びSは表面上の位置に依存し、法線には依存しないために問題が生じる。このことは、上記の値I/Rの平均として計算することができるB(N)を使用して実現できるレンダリングの質が、関係する法線におけるR及びSの変化の程度に依存することを意味する。それにもかかわらず、存在するある程度の鏡面反射成分を近似するであろう。従って、ランベルトのレンダリング方程式を使用して計算された光からのレンダリングに単純に基づいたものよりも、より正確に近似しているレンダリングになるであろう。当然のことながら、もう1つの方法を使用すれば、鏡面反射を含む非線形モデルに基づいて、光を計算し、そのモデルを使用して描画することができる。しかしながら、本発明の方法においては、これは複雑さを増加することなく実現されるが、他の方法では、鏡面反射率方程式を明示的にモデル化する必要があり、複雑さと計算コストの増加を伴うであろう。

【0071】逆に、照会に対して異なったモデルが描画されるときには、鏡面反射は非常に明るい成分を有する傾向があるため、鏡面反射がある場合には、B(N)が非常に不適切な値になると予想される。このことにより、大きな誤差が、正しい順位よりも間違ったモデルの順位に比例して加えられることになる。従って、照会内の鏡面反射は、実際に本発明の有効性を増加させることができる。

【0072】本発明者らは、本発明の方法の2つの変形に対応する測度が密接に関連していることを注意する。2つの測度は、それぞれ、(1)描画された画像と照会との間の誤差であり、(2)各ビンの中の光球係数値 (lightsphere coefficient value) の加重分散である。分散の計算に使用される各係数は、照会内の点から生じたものである。その法線のビンに対する平均の光球係数を使用して点が描画される場合、レンダリングに使用される平均の係数と平均の計算に使用された正確な係数との間の差異に、誤差は(反射率を介して)比例するであろう。反射率乗数 (reflectance multiplier) がなければ、ビンに含まれる点を合計する場合に、誤差の1つの集合の自乗和は差の自乗和と同一であり、後者はサンプルの数により加重されたビンの分散と正確に同一である。従って、2つの測度は誤差の和における反射率の重みづけ因子のみが異なることになる。画像間の誤差は、RMS (root mean square) 誤差、すなわち等価的にSSD (自乗誤差の和) を意味することに注目すべき

である。他の誤差測度も、同様に利用可能である。

【0073】本発明は、その機能が物体の多数の3Dモデルを蓄積しており、照会画像の提示に応じて照会に対応する最も可能性のある蓄積されたモデルを提供するための、大規模システムの構成要素としての役割を担うことを目的とする。このようなシステムの概略図を図1に示す。非同期的に、かつ任意の長さの時間にわたって、本システムには、典型的には人の頭、望ましくは人の顔である3D物体10が提示される。本システムは、走査装置20を使用して3D物体を走査してデジタル化し、これと同時に含まれる全ての3Dデータ点における反射光画像を撮像する。反射率推定モジュール30は、3D物体10に対する反射率関数を計算する。この情報は、次に、データベース40に蓄積される。この記憶装置は面法線についての情報を保持してもいいし、或いは面法線はデータが使用される時点で必要に応じて後に計算してもよい。

【0074】任意の時点に、照会画像50が照合のために本システムに提示される。光球60は、2D照会50を蓄積された3Dモデル10のそれぞれと比較し、最も良い一致70を選択するために使用される。与えられた照会及びモデルに対して、他の蓄積データに基づいて、ポーズを計算する別のモジュールは示されていない。このポーズ情報は、光球モジュール60により必要とされる。

【0075】図2は、図1の光球モジュール60を詳細に示す図である。照会画像50は照合のために提示される。光球モジュール60は、モデル10を照会画像50との類似性について次々に検討するサブモジュール140を有する。これを行うために、サブモジュール140はデータベース40から次のモデル10を得るとともに、ポーズモジュール120からモデル10及び照会画像50に対するポーズ解 (pose solution) を得る。これは、照会画像50及びモデル10の推定対応点を設定するために必要である。ポーズ解演算は、この照会画像50を用いて全てのモデル10に対して以前に行われても良く、或いは、光球モジュール60による要求に応じて行われてもよい。

【0076】光球モジュール60の主ループは、サブモジュール150により画像50に対して反復される。サブモジュール150は、ポーズモジュール120からの対応を使用し、画像50の各点において、モデル10から反射率Rを検索し、輝度係数  $I/R$  を計算するために、その点における画像50内の強度Iを使用する。次に、サブモジュール150は、その点に対応するモデルの面法線Nを検索し、光球データ構造160内の何処に輝度係数  $I/R$  を挿入するかを判定するためにそれを使用する。この挿入は、アルゴリズムのどの変形が最終段階で実行されるかにより、単純な加算、或いは挿入された値の記録から成る。最終段階の第1の変形は、光球デ

ータ構造160内に和として蓄積された情報を使用し、モデルのレンダリングを行うモジュール170から成る。和は、平均に変換されることが望ましい。次にこのレンダリングは照会画像50と比較され、重要な点について、RMS誤差が上述のように計算される。この誤差は、そのモデルに対する誤差測度として格納される。或いは、最終段階の第2の変形においては、モデル10及び照会画像50は再度参照されず、モジュール180において各ピンにおける分散を計算するために光球データ構造160のエントリの記録が使用され、誤差測度を導出するためにこれらの分散の加重和が使用される。次に、この誤差測度は、そのモデルに対する誤差として格納される。最後に、最良の誤差測度を備えるモデル70が選択され、照会画像50に対する最も良い一致として出力される。

【0077】光球データ構造上の動作を、図3に詳細に示す。データ構造160自身は、ガウス球の半球体を埋め尽くすピン200の集合から成る。もう1つの半球体上に法線を有する点は見えないから、カメラに見える点の全ての面法線210は、これらのピン200の1つの中にある。本方法が照会画像50全体に反復して、ランベルトのモデルでは  $bL \cdot N(2)$  と同じであると予想されている  $I/R(2)$  を計算する。モデル10からこの点について既知である  $N(220)$  の値は、データ構造160の正しいピン200を選択するために使用される値である。次に、値  $I/R$  が、本発明の方法のどの変形が使用されるかに依存して、合計或いは記録することにより、このピン200に挿入される (230)。

【0078】以上では、モデル評価プロセスが、上述したように任意の時点において1つのモデルのみが評価されている逐次的なものとして示したが、部分的解を使用して多数のモデルに注意を分割することが可能であり、これにより、モデルが他のモデルとの競合において少ない誤差を有し続ける場合にのみ、モデルを完全に評価するコストが費やされるようになる。

【0079】更に、最終的な誤差順位付けプロセスを行う前に、1つのモデルに対する光球結果 (lightsphere result) は、どの他のモデルに対する結果をも必要としない。従って、全体のプロセスを大規模並列処理により、総合的速度を数に比例させることも可能である。

【0080】次に、光球モジュール60についてさらに詳細に説明する。光球モジュール60は、2つの段階に分けることができる。

1. 前処理段階。

【0081】a. 照会を最も良く説明するモデルのポーズを計算する。

【0082】b. 照会上の点に対応するモデルの面法線の重ねあわせ画像を生成する。

【0083】c. 照会上の点に対応するモデルの反射率の重ねあわせ画像を生成する。

2. 照会画像と連係してガウス球の上の明度係数を計算するために、段階1で供給された情報を使用する段階。

【0084】段階1では、この目的のために使用可能な多くの公知方法のいずれかによって、ポーズが計算される。法線及び反射率の重ねあわせ写像の生成が、標準かつ公知のコンピュータ・グラフィックス方法により行われる。3Dモデルと組み合わせられた反射率の計算は、単純な手順ではないが、このような手順は当該技術分野において公知であるため、その計算の説明は省略する。3Dモデルと組み合わせられた反射率を計算するための1つの方法は、平坦な照明状態の下で撮影された画像を単に使用することである。

【0085】前処理段階への入力は、照会画像Q、候補3DモデルM及びカメラモデルKから成る。前処理段階の出力は、ポーズT、重ねあわせ反射率画像R及び重ねあわせ法線写像Nである。光球モジュールへの入力は、照会画像Q、重ねあわせ反射率画像R及び重ねあわせ法線写像Nから成る。光球モジュールの出力は、法線-明度表B及び誤差測定Eである。

【0086】これらの入力及び出力を次に正確に説明し、また光球出力を計算する方法も正確に説明する。ここで使用する定義は、今まで使用した定義とは、わずかに異なることに注意されたい。

【0087】説明を単純にするために、モノクローム画像のみを考慮する。カラー画像に対しては、以下に説明するプロセスが、各色成分例えば赤、緑及び青に対して別に繰り返される。

【0088】照会画像Qは、実平面上に定められる関数であると考えられる。

【0089】

【数9】

$$Q: R^2 \rightarrow R^+$$

この表記法は、Qが2次元の実ユークリッド面から非負の実数への写像であることを意味する。Qは、前記平面のある有限の長方形内で非零値のみをとるか、定義されている。実際には、Qは整数の座標値のみを取るように、有限の離散的格子においてのみ標準化される。Qは関数であり、他方、記号Q(p)は、Qが点pを写像する実数を示すことに注目されたい。ここでpは $R^2$ 内の点である。

【0090】3DモデルMは、数個のサブパートから成る。これらは、モデル上のサンプル点の位置である $R^3$ 内のn個の点の集合

【0091】

【数10】

$$\{p_i | i = (1, 2, \dots, n)\}$$

及び各対応する $p_i$ における表面反射率を表すn個の実数の対応する集合 $r_i$ を有する。

【0092】カメラモデルKは透視投影である。

【0093】

【数11】

$$K: R^3 \rightarrow R^2$$

ここで、剛体運動による若干の座標系の変更により、ある正の実数aに対して、

【0094】

【数12】

$$K(x, y, z) = a^* (x, y) / z,$$

となる。

【0095】座標の変更はカメラモデルの一部である。透視投影の定義を形式化する他の多くの方法がある。この1つは等価であり、正確な形式化は重要ではない。光球計算の目的のためには、カメラの歪みの影響は考慮されず、カメラモデルは固定されている。カメラについてのより多くの情報を使用するように変形することも容易である。カメラモデルKの値及び空間内の3Dモデルの位置によって、この定義は透視歪みのいくらかを許容することに注目されたい。しかし、照会を生成する真のカメラ及び被写体の位置が多少の透視歪みを生ずるとしても、以下の説明では、この差は補償されない。より詳細なカメラモデルではこれを達成することができる。

【0096】ポーズTは、 $R^3$ 内の剛体運動であり、カメラモデルKを介して投影された後に、モデルMに適用された場合には、モデルMの画像が照会Qと最も良く重ねあわせられる。

【0097】すなわち、ポーズTは次の数式を、点 $p_i$ 及び $q_i$ のある集合に対して同時に満たそうとする。

【0098】

【数13】

$$K(T(p_i)) = q_i$$

ここで、 $p_i$ は3次元モデルの点であり、 $q_i$ は照会画像の対応点である。

【0099】重ねあわせ反射率画像Rは、写像

【0100】

【数14】

$$R: R^2 \rightarrow R^+$$

であり（第1のRは、第2及び第3のRとは異なることに注意されたい。）、照会画像Qと同じ格子上で次のように標準化されている。

【0101】

【数15】

$$R(K(T(p_i))) = r_i$$

換言すれば、照会画像Q内の点を与えられると、反射率は、ポーズ及びカメラモデルを与えられると、照会内の点への投影であるモデル内の点のものであることを、Rにより示している。モデル上の数個の点が、照会内の単

一の点に投影されるかもしれないことに注意すべきである。すなわち、仮定されたポーズ及びカメラモデルの下で実際に見えるモデルの表面に対応する唯一のRを見出すために、隠面消去のコンピュータグラフィックス技術が必要である。これを行うことができる多くの公知のコンピュータ・グラフィックス技術が存在する。この計算を行うためには、所有権を主張できるパッケージ及び無料で利用できるパッケージのいずれが使用されても良い。

【0102】3DモデルMの点 $p_i$ への面法線 $n_i$ は、 $p_i$ におけるMの表面に直角な方向を表す $R^3$ 内の単位ベクトルである。 $n_i$ の計算には、Mの近傍点、すなわち、Mが表す表面上の近傍のいくつかを知る必要がある。本発明者らの装置において、M内のデータは各点を走査しながら測定するシステムから得られるため、これは前もって知ることができる。更に、例えば表面の三角形分割として知られるプロセスによって、低位に順序付けられた点の集合をこのような隣接点が公知である形式とすることができる標準のコンピュータ・グラフィックス技術がある。 $p$ が近傍 $q$ 及び $s$ を有する場合には、 $p$ における単位法線は次式により計算することができる。

【0103】

【数16】

$$v = (p - q)X(p - s)$$

【0104】

【数17】

$$n = v / ||v||$$

ここで、 $X$ はベクトルの外積であり、 $||v||$ は $V$ のノルムである。

【0105】実際には、多くの場合、 $p$ の数個の近傍、例えば、格子内の8個或いは4個の近傍を考慮し、計算された値の平均をとることが良い。

【0106】 $n$ は $R^3$ 内のベクトルであるため、次式のように書くことができる。

【0107】

【数18】

$$n = (n_x, n_y, n_z)$$

ここで、3つの成分は $n$ のそれぞれ $x$ 方向、 $y$ 方向及び $z$ 方向における成分である。しかしながら、 $n$ が単位ベクトルであるという必要条件是、次式の制約条件を課すことになる。

【0108】

【数19】

$$1 = ||n||^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

これは、球面方程式、すなわち、3次元空間(3-space)内の球の表面と見なすことができる。幾何学的に

は、 $n$ が起点(origin)に固定されていると考えられる場合、 $n$ は単位ベクトルに対して全ての可能な値の間で変化するため、その先端部は単位球面の表面上で変化する。従って、各 $n$ はこれらの先端部の位置、すなわち球面上の点で同定することができる。球面は $S^2$ により、通常、示される。

【0109】この同定が表面の単位法線と微分幾何学における球面の間で行われるとき、球は通常「ガウス球」と呼ばれ、表面の各点をその法線へ写像する写像は「ガウス写像」として知られている。

【0110】これを念頭において、重ねあわせ法線写像は、次式による写像と定義することができる。

【0111】

【数20】

$$N: R^2 \rightarrow S^2$$

ポーズ $T$ 及びカメラモデル $K$ の下で、 $Q$ の点に投影する3Dモデル $M$ の点における面法線に対して、上式による写像は照会画像 $Q$ 内の各点を取る。すなわち、重ねあわせ反射率に対する同様な数式15と対比して、 $N$ は次式を満たすように定められる。

【0112】

【数21】

$$N(K(T(p_i))) = n_i$$

ここで、今度は $n_i$ は点 $p_i$ における前処理段階で計算された法線である。

【0113】 $N$ は、再度、 $Q$ の格子点と組み合わせられた格子点においてのみ計算される。 $N$ の計算は、 $R$ の計算のように、見える表面に対する $n$ の値のみが使用されることを保証するために隠面消去を必要とする。これは、再度、既存の標準のコンピュータ・グラフィックス技術を使用することにより、最も容易に行われる。正及び負の座標方向の各組み合わせ、すなわち、 $+x$ 、 $+y$ 、 $+z$ から来る光のそれぞれに対して6つの異なる光源を使用して、グラフィックス・エンジンがレンダリングを計算することを可能にすることにより、これを行うために既存のグラフィックス・インタフェースを利用することができる。グラフィックス・エンジンにランベルトのレンダリング・モデルを使用することにより、各点における法線ベクトルの正及び負の成分が生ずる。これは更に、補間のためにグラフィックス・エンジン技術の使用を可能にし、アルゴリズムの性能に著しく役立つ。

【0114】光球アルゴリズムは、照会 $Q$ 、重ねあわせ反射率画像 $R$ 及び重ねあわせ法線写像 $N$ から法線一明度表 $B$ を計算する。

【0115】 $B$ をどのように計算するかを定義し説明する前に、次式の写像を考える。

【0116】

【数22】

23

$$A: S^2 \rightarrow R^*$$

$N(q) = n$  であるとき、数式 22 は次式により与えられる。

【0117】

【数 23】

$$A(n) = Q(q) / R(q)$$

表記法を簡単にするために、次式のように定義する。

【0118】

【数 24】

$$D: R^2 \rightarrow R^+$$

【0119】

【数 25】

$$D(q) = Q(q) / R(q)$$

(他の箇所では、これは  $I/R$  と呼ばれる。)

$A$  は、 $A(n) = D(N^{-1}(n))$  により定められることとする。しかしながら、法線が  $n$  である多くの点があってもよく、従って、 $N^{-1}(n)$  は単一の点ではなく、点の集合である。 $A$  を評価するために、この点の集合上の  $D$  の平均を取ることが望ましい。すなわち、次式が、法線  $n$  に写像する照会内の点の集合であると仮定する。

【0120】

【数 26】

$$P(n) = \{p | N(p) = n\}$$

$$I(p) = A(N(p))R(p) = D(p)R(p) = Q(p) / R(p)R(p) = Q(p)$$

従って、一般的には、 $A(n)$  を得るためにいくつかの値が平均される工夫を行うことが不可欠である。これを行う方法は、十分な数のバケットが 2 つ以上のサンプルを含むように、十分な数のビン (或いはバケット) にガウス球を離散化することである。球面を離散化するには、多くの方法がある。例えば、同一点に中心を合わせた二十面体を球面であるとし、その二十面体をその球面に半径方向に投射する。これは、球面の分割或いは埋め込みを与える。しかしながら、本発明者らの目的のためには、球を打ち切る非常に単純な方法を使用することで、機能が発揮されることが判明した。以下にそれを説明する。

【0124】まず、単位法線ベクトルから始める。

【0125】

【数 29】

$$n = (n_x, n_y, n_z)$$

本発明の方法においては、カメラの方向を向いていない面法線を有する表面点は、カメラから見ることはできないため、この面法線には関心がない。「カメラの方向を向いていない」とは、 $v$  が表面上の点  $p$  からカメラの透視投影中心の方向を向いているベクトルであり、 $n$  が点  $p$  における外向き法線であれば、 $*$  が内積であり、 $n *$

24

本発明者らの目標は、 $A$  を次式により定義することである。

【0121】

【数 27】

$$A(n) = \frac{1}{\#(P(n))} \sum_{P(n)} D(p)$$

ここで、 $\#(P(n))$  は、集合  $P(n)$  (或いは、連続した場合には集合の測度 (measure)) 内の点の数である。これは意味のある量である。

【0122】しかしながら、離散的格子の場合には、これは不適切である。この場合、照会画像の離散的格子上で演算されている。問題は、法線が 3D モデルから導出されているということであり、一般に、離散化された値は 3D モデルデータの正確度と法線が計算された方法とにのみ依存する。特に、値は一般的に非常に細かく離散化されるので、照会の任意の 2 つの離散化された点  $q_i$  が同一法線  $n$  に写像されることはあり得ない。よって、ほとんど全ての  $A(n)$  は、単一のサンプルのみから生ずることになる。この場合には、モデルから画像を描画するために使用されるときに、光球の計算は容易であり、すなわち、単に次式の量のみを計算することになり、光球の計算は正確に照会画像値をもたらす。

【0123】

【数 28】

$v < 0$  であれば、 $n$  がカメラの方向を向いていないことを意味する。従って、ガウス球の 2 分の 1 (上記の不等式が成立しない 2 分の 1) の上の法線  $n$  のみに関心がある。カメラ軸が  $z$  軸に沿っており、カメラが被写体から正の  $z$  方向にある座標系を当分の間使用することになる。従って、関心のある全ての面法線の集合は、正確に  $n_z > 0$  である。これは、 $x-y$  平面の上に置かれている半球状のキャップであると考えることができる。

【0126】さて、本発明者の目標は、値  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  に基づいて、この半球状のキャップを離散化することである。これを行う最も容易な方法は、 $z$  成分をまったく無視し、円形の円盤である  $x-y$  平面上への半球状のキャップの投影のみを考慮することである。本発明者らはこの円盤を離散化し、平面から半球体まで  $z$  に沿って逆投影し、半球体の離散化を定める。この平面内の単位円盤を離散化するために、本発明者らは、単に平面内の単位正方形を離散化し、それを円盤に制限する。次の説明を簡単にするために、単位正方形は、次式により与えられる平面の部分であると考えられる。

【0127】

【数 30】

$$0 \leq x < 1 \quad \text{and} \quad 0 \leq y < 1$$

(単位法線成分の値は-1から+1まで変化するため、これはスケーリング及びシフトを含む。実際のプログラムにおいては、これは容易である)。

【0128】これを実行する方法は次の通りである。m個のピンが存在するように、すなわち、 $m \times m$ の正方形に離散化する。次のように、単位正方形を $m^2$ 個の部分正方形 $S_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, m$ , に分割する。仮に次式が成立すれば、単位正方形の点 $p$ は、部分正方形 $S_{ij}$ 内にあることになる。

【0129】

【数31】

$$(i-1)/m \leq p_x < i/m$$

【0130】

【数32】

$$(j-1)/m \leq p_y < j/m$$

ここで、 $p_x$ は $p$ の $x$ 座標であり、 $p_y$ は $y$ 座標である。

【0131】次に各部分正方形 $S_{ij}$ が「ピン」或いは「バケット」であると考慮し、上記の数式31及び32が満たされた場合に、 $p$ は $(i, j)$ 番目のバケットに含まれると言う。

【0132】この定義を使用して、唯一のバケット $(i, j)$ は、次のように各単位法線 $n$ に対して定めることができる。第1に、シフト及びスケールが実行されているため、次式のように定義する。

【0133】

【数33】

$$n' = [n + (1, 1, 0)] / 2$$

上述したように、これは、単位正方形の上に置かれるように半球体を動かして縮小する。(これは、簡単な表記が望ましいために必要なだけである。この全部の分析は、 $x$ 及び $y$ 内で-1から+1までからなる正方形でもまったく同じである。)ここで、 $p_x$ の代わりに $n'_x$ を、 $p_y$ の代わりに $n'_y$ を使用し、正方形を半球体へ投射する効果を有する $n_z$ は単に無視して、数式31及び32に従って $i$ 及び $j$ を計算する。これらの $(i, j)$ 座標は、基本的な光球手順に対してピンを定める。これらはガウス球上で一様な寸法ではないことに注目すべきであるが、照会画像内では一様であるから、このことは実際には重要ではない。

【0134】さて、アルゴリズムは、照会画像の画素についてを系統的に繰り返すことにより、進行することができる。第1に、アルゴリズムは各ピンに対してデータの2つの項目、すなわち実行和と、ここまで和で使用されたサンプル数の度数とを保持しなくてはならない。次に、アルゴリズムが照会画像 $Q$ について繰り返すことに伴って、各画素 $p$ において、アルゴリズムは反射率画像 $R$ 及び法線画像 $N$ を参照する。アルゴリズム

は、 $D(p) = Q(p) / R(p)$ の値を計算し、この値を $(i, j)$ 番目のピンに加える。ここで、 $(i, j)$ は数式31及び32に従って法線 $N(p)$ の値から計算される(ここで、また以下の説明で、このことによって、上記の $n'$ を与えたものと同じスケール及びシフト演算が考慮に入れられたことを意味すると、理解される)。更に、アルゴリズムは $(i, j)$ 番目のピンに対して度数を増加させる。アルゴリズムは、照会画像に関する繰り返しを終了すると、平均を得るために、そのピンにおける度数によって各ピンにおける和を除算する。これは、上述の $B(n)$ である数 $B(i, j)$ の表(明度表)をもたらす。

【0135】実際には、以上説明したように、上の計算に特定の照会画像点を含めるか否かを定めるために、付加的な基準が使用される。例えば、明るすぎるか、または暗すぎる像点は除去される。

【0136】これまでのところ、本発明の方法を、モデルの描画された画像と照会画像の間の誤差を品質判定基準として使用する変形に対して説明した。

【0137】光球データ構造 $B(i, j)$ を使用して、画像を描画するために、アルゴリズムは次のように進行する。アルゴリズムは、重ねあわせ反射率画像 $R$ の各点に関して繰り返される。 $R$ の各点 $p$ において、アルゴリズムは重ねあわせ法線画像 $N$ 内の法線 $N(p)$ を検索する。このように検索した $N(p)$ の値を使用して、アルゴリズムは、数式31及び32を使用して対応する光球ピン $(i, j)$ を計算し、値 $B(i, j)$ を検索する。次にアルゴリズムは次式を計算し、最大輝度よりも大きい値を避けるためのクリッピングの後に、その値に対して描画された画像 $I$ の輝度値を決定する。

【0138】

【数34】

$$I(p) = R(p)B(i, j)$$

実際には、最後の計算が行われる前に更に段階がある。実際の法線値の数と比較すると極めて少数のピンしかないので、値 $B(i, j)$ を直接使用することは、ピンの粗いデジタル化によって、かなりのアーチファクトを生ずる。従って、代わりに補間値 $B'(p)$ が使用される。補間は、法線 $N(p)$ の値に基づいている。 $(i, j)$ 番目のピンにより定められた正方形の何処に $N(p)$ が含まれるかは既知であるから、補間された $B(ip)$ に到達するために、 $B(i, j)$ の隣接する値を有する双一次補間が単純に使用される。補間された $B'(p)$ は、次に次式を計算するために使用される。

【0139】

【数35】

$$I(p) = R(p)B'(p)$$

次に誤差 $E$ が、照会画像 $Q$ と描画された合成画像 $I$ の間

の平方差の和或いは平均 2 乗誤差の平方根として計算される。描画された合成画像 I は、I の構築方法に基づいてすでに重ねあわされている。

【0140】ここで、光球の分散を使用するアルゴリズムの別の変形に戻る。これは、各ビンに結び付けられたデータがわずかに複雑であること以外では、上述したものとまったく同様に進行する。各ビンに対して実行和と度数とを保持する代わりに、各ビンに対して、そのビンに含まれる全ての D (p) 値についてのリストが保持される。反復が完了すると、各ビンの中の値のリストの平均及び分散が、そのビンに対して計算される。平均は、上に定めた B (i, j) とまったく同じである。更に、ここでは分散 V (i, j) も保持している。

【0141】分散を使用する第 1 の変形では、誤差 E はこれらの分散の和として定められる。

【0142】

【数 36】

$$E = \sum_{i,j} V(i,j)$$

第 2 の変形では、本発明者らはこの和に度数による重みをかける。この和は、描画された画像と先に使用された照会画像との間の平方差の和に、より類似するであろう。

【0143】累積プロセスに保持された度数を C (i, j) と呼ぶ。従ってこの変形において、誤差測度は次式により与えられる。

【0144】

【数 37】

$$E = \sum_{i,j} C(i,j)V(i,j)$$

光球計算を行うための少数の方法の例を提示したが、様々な構成要素及び誤差項に対して使用可能な他の数式及びアルゴリズムがあることに、注意すべきである。これらの数式及び説明は、本発明の実施形態を実現するための 1 つの例であるに過ぎず、他の多くの方法が単純な修正や追加により可能である。

【0145】本発明の方法は、C プログラム言語及び C ++ プログラム言語の両方で実際に実現され、37 個の 3 次元モデルと 37 個の主題から成る実際の照会を収容しているパイロット・データベースで、7 つのポーズと 6 つの照明条件の全ての組み合わせで試験された。

【0146】実際に実現された本発明の方法の性能を最適化するために、以下のいくつかの付加的な技術が利用できる。

【0147】1. 640×640 の解像度を有する画像及びモデルに対して、光球ヒストグラムのための 32×32 個のビンの格子が良く動作することが判明した。24×24 個のビンも良く機能を発揮する。ビンの数は、

輝度係数の正確度と平均の統計的有意性との間にトレードオフを課する。小範囲の法線が平均して使用されるため、ビンが多いほど正確度は増加し、ビンが少ないほど多数の法線が各ビンに含まれることにより平均の統計的有意性は改善する。従って、データを観察し適切な数のビンを選択することによって、これらの効果の大きさを評価することにより、本発明の方法を更に改良することができる。

【0148】2. ビンに対してガウス球の埋め込みを使用することが可能である。これは、光球ヒストグラムの計算及びそれからのレンダリングにおける僅かな費用を犠牲にして、性能を改善することができる。更に、単位円盤の埋め込みをガウス球に投射することが、すなわちビンの判定に z ではなく x 及び y の値のみを使用することが、サンプリングの不均一を招くにもかかわらず、非常に効果的であることが判明した。

【0149】3. ヒストグラム・ビンは画像及びモデルの解像度と比較して非常に粗いため、レンダリングを行うときに、光球値の双一次補間が外観及び正確度の両方を大幅に改善することが判明した。

【0150】4. ランベルト面を持つ物体に対して、画像強度を与える積分における内積は、法線と光の向きとの間の余弦に帰着する。法線の関数として結果として生ずる画像強度は、本質的に、光度分布を有するこの余弦のたたみ込み (convolution) である。影のない場合には、これは低域フィルタ動作になる。従って、照明を解き次にレンダリングを行うシステムにおいて、このたたみ込みの効果により、法線の関数としての輝度の滑らかさが強化されるであろう。本発明の方法においては、光球計算は、滑らかさを強化するためのこのような機構を含んではいない。従って、光球のデータは、ランベルトからのずれ、反射率誤差などのような、複数の原因がもたらす高周波成分を有するように変形する可能性がある。従って、光球ヒストグラムに少量の平滑化を行うことが有用であることが判明した。これは、単純な箱形関数を使用するたたみ込みにより、行うことができる。これは、本方法のレンダリング及び性能を大幅に改善する。

【0151】5. 光球データ構造を計算するために数式 4 を使用する場合、非常に低い反射率を有する点は、除算が実行されるときに莫大な数を与える恐れがある。このような点は無意味な結果を招く。この問題を避けるために、反射率を計算に入れる前に、反射率が超えるべき最低閾値が使用される。この閾値は現在適宜に設定されているが、反射率は反射率ヒストグラムを調べて計算することもでき、各モデルについて 1 回蓄積すればよい。この閾値の計算は、モデルがデータベースに加えられる時に実行できるため、任意の複雑な方法をその計算のために使用することができる。極端な例として、この閾値は、多数のモデルの合成レンダリングに基づいて、

データベース内の他のモデルから最適の識別性能を得るように設定することもできる。

【0152】6. 極端な鏡面反射は、距離データが信頼できない目の中の領域のような点と結びついている傾向がある。更に、このような点は強度尺度 (intensity scale) を飽和させる傾向がある。従って、光球計算に含めるためには、その強度値に、超えてはならない最高閾値を課することが望ましい。同様に、照会の極端に暗い領域は、影内の領域或いは (髪のような) 反射率計算がほとんど意味のない領域のいずれかと強く結びついている。これらの両方は使用上の誤差の原因であり、従って、強度の最低閾値も照会に使用される。

【0153】当業者は、本発明の方法が、光源或いは、固有ベクトル決定のような他の複雑で多大の時間を要する計算を解く必要のない物体の照会方法を提供することを十分理解するであろう。即ち、本発明の方法は、従来技術による方法に対して次の利点をもたらす。

【0154】1. 従来技術による方法に対する主要な利点は計算量の莫大な節減である。この節減は、全体のシステムにおける実用性と非実用性との間の差を作ることになる。例えば、相互情報量を使用する従来技術による方法は、原理的にはより一般的であり、おそらく、より効果的であるが、モデルとの大量の数の比較を必要とする応用に対して応用不可能である位に計算量が多い。

【0155】2. 本発明の方法は、従来技術による方法より簡単である。本発明の方法は、ヒストグラム状のデータ構造を構築するただ1つのプロセスしか必要としない。このプロセスは、モデルの各点を調べることでより少し手間がかかるだけである。予め蓄積された法線及び反射率を抽出し、ヒストグラムを更新するために少数の演算段階を行うにすぎない (データ構造はヒストグラムと述べられているが、実際には少々一般化されている。)。これと比較して、他の方法は、当該問題のサイズに対して1桁或いは2桁多くのコンピュータ時間を使う反復アルゴリズムを必要とする。例えば、従来技術によるある方法は、いわゆる非負の最小2乗法アルゴリズムの使用を必要とし、これは複雑な反復アルゴリズムである。同様に、従来技術による他の処理法は、いわゆる主成分の計算を必要とする。これらの計算は、固有ベクトル分解を見い出すことを必要とし、更に複雑な反復アルゴリズムを必要とする。これらの複雑なアルゴリズムは公知であり理解されているけれども、本発明の方法よりも非常に複雑である。

【0156】3. 本発明の方法は他の方法よりも安定である。従来技術による方法は、制約条件の下で連立1次

方程式の解を見い出すこと、或いは、固有ベクトルのような線形の不変量を解くことに、通常依存する。これらの方法の安定性が、どのようにデータ及び仮定に依存するかを予測することは多くの場合難しい。本発明の方法は本質的に単純であるから、不安定な解は容易に回避することができる。

【0157】4. 本発明の方法は、部分的解が使用できるシステムへの使用が容易である。例えば、照会のために多数の候補モデルを考慮する場合、誤差が十分に大きいと判明すると、すぐに多くのモデルを廃棄することができる。本発明の方法を使用して、多くの段階において、誤差或いは品質項目の計算を中断し、必要であれば後の段階で再開することが可能である。従来技術による方法では、その方法の最もコストのかかる部分を使わずに、これを実行することは困難或いは不可能である。

【0158】5. 本発明の方法は、未知の反射モデルに適応可能である。光源を計算する必要がないため、撮像される材料に対する照明効果のみが測定され、一致していると仮定される。たとえ鏡面反射 (光沢度) があっても、本発明の方法は、材料特性の合理的な範囲にわたって良い結果をもたらすことができる。

【0159】6. 本発明の方法は、特に、獲得された反射率データに照明の影響が存在してたととしても、反射率の獲得における誤差に対して安定である。

【0160】本発明の方法は、非常に高速であり、大量の計算を必要としないため、10倍~100倍の計算コストを要して (かつ、ゆっくりと) 検査されるべき候補モデルを選別するためにも、システム内で使用できる。これらの他の方法は、より正確な照会能力があるが、候補モデルの大規模データベースに対しては多大の計算コストを要する。

【0161】本発明の好適な実施形態と考えられるものを示し説明してきたが、本発明の技術思想から逸脱することなく、形式或いは細部のさまざまな修正及び変更が容易に行えることは、当然理解されよう。従って、本発明は説明し例示した正確な形式に限定されるものではなく、添付した特許請求の範囲内に含まれる全ての修正を含むように構成されることが意図されている。

【図面の簡単な説明】

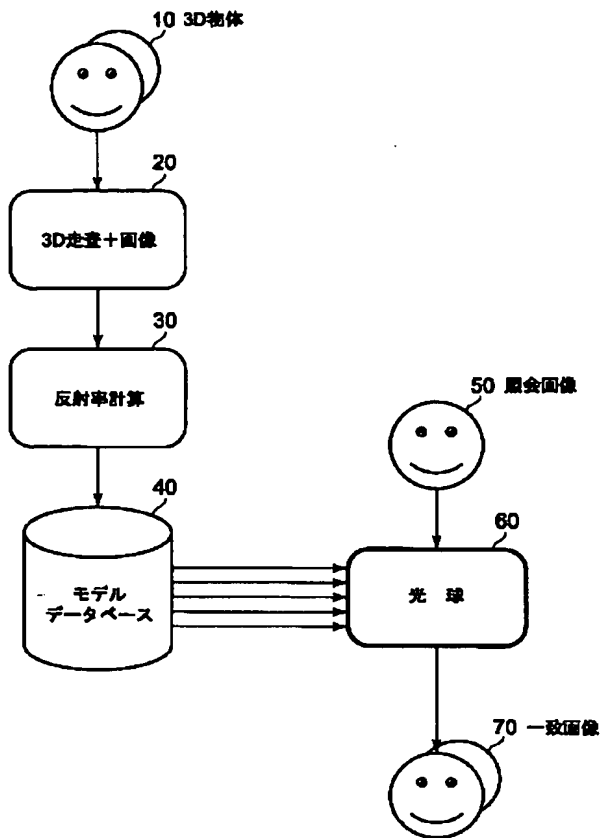
【図1】本発明の方法の概念図である。

【図2】図1に示した光球モジュールを更に示す図である。

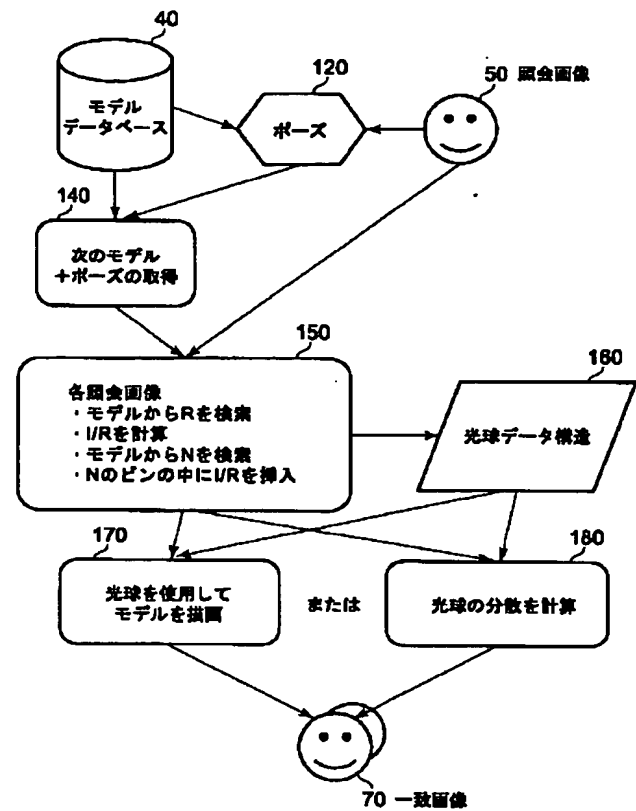
【図3】図2に示した光球データ構造を示す説明図である。



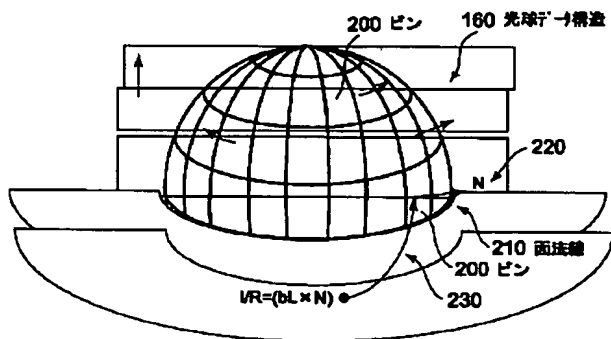
【図 1】



【図 2】



【図 3】



フロントページの続き

(72)発明者 アルバート・ピーター・ブリッカー  
アメリカ合衆国、 ニュージャージー  
08540、 プリンストン、 インディペン  
デンス ウェイ 4 エヌ・イー・シー・  
リサーチ・インスティテューテュ・インク  
内

Fターム(参考) 5B057 BA02 CA01 CA08 CA12 CA16  
CD14 CD17 CE16 DA11 DB02  
DB03 DB06 DB09 DC08 DC23  
DC25 DC33  
5L096 AA02 AA09 BA03 DA02 FA33  
FA37 GA41 JA09